

(19)日本国特許庁(JP)

(12)公開特許公報(A)

(11)特許出願公開番号

特開平11-160746

(43)公開日 平成11年(1999)6月18日

(51)Int.Cl.⁸

G02F 1/37

識別記号

FI

G02F 1/37

審査請求 有 請求項の数9 OL (全11頁)

(21)出願番号

特願平9-324398

(22)出願日

平成9年(1997)11月26日

(71)出願人 000004237

日本電気株式会社

東京都港区芝五丁目7番1号

(72)発明者 古宇田 光

東京都港区芝五丁目7番1号 日本電気株式会社内

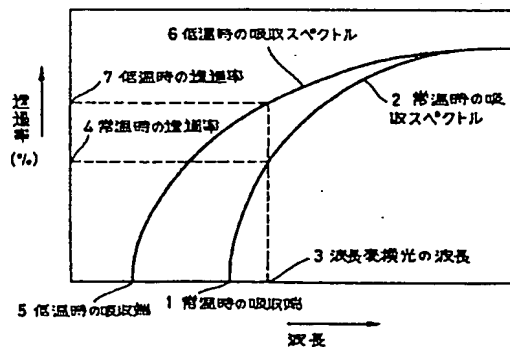
(74)代理人 弁理士 ▲柳▼川 信

(54)【発明の名称】 波長変換方法及び波長変換素子

(57)【要約】

【課題】 変換効率が大きく、温度制御し易い波長変換を行う。

【解決手段】 波長変換素子の温度を0℃以下に冷却することにより、常温での吸収端1近傍の波長の透過率4を、低温時の吸収端5の透過率7の様に向上させ、変換光を効率良く安定して発生させる。



常温と0℃以下に冷却した波長変換素子の吸収スペクトル

【特許請求の範囲】

【請求項1】 波長変換材料の吸収端の波長から長波長側に100nm範囲の波長変換光を得るようにした波長変換方法であって、波長変換素子を0℃以下に冷却して波長変換をなすことを特徴とする波長変換方法。

【請求項2】 前記波長変換素子はベータバリウムボレイトであることを特徴とする請求項1記載の波長変換方法。

【請求項3】 波長変換素子から出力されるレーザー光の進行方向を180°回転させて、前記波長変換素子へ再入力することを特徴とする波長変換方法。

【請求項4】 3つの角度が90°、45°、45°に夫々加工された三角柱プリズム素子からなり、レーザー光をこの三角柱プリズム素子へ入射せしめ直交する2面に2回反射させることにより、入射レーザー光と波長変換された出力光との進行方向を互いに180°異なるようにしたことを特徴とする波長変換素子。

【請求項5】 入射レーザー光及び波長変換後の出力光の入射面及び反射面の少なくとも一つの面に、当該面よりも大なる熱伝導率を有する材料を直接接合したことを特徴とする波長変換素子。

【請求項6】 前記材料として、波長変換光に対して透明なダイヤモンド、サファイヤ、水晶、ガーネットのいずれかを使用したことを特徴とする請求項5記載の波長変換素子。

【請求項7】 波長変換用部材と、より熱伝導率が大なる部材とが交互に複数枚積層して接合されていることを特徴とする波長変換素子。

【請求項8】 前記波長変換用部材の各々は、ウォークオフ角を補償すべく位相整合方位を軸に180°回転した位置で接合されていることを特徴とする請求項7記載の波長変換素子。

【請求項9】 前記接合はオプティカルコンタクトでなされていることを特徴とする請求項8記載の波長変換素子。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】 本発明は波長変換方法及び波長変換素子に関し、特に半導体製造プロセス、微細加工、医療等に应用され波長変換された短波長のレーザー光を得るための波長変換方法及び波長変換素子に関するものである。

【0002】

【従来の技術】 レーザ光の波長変換を行う場合、波長変換素子は当該素子中に含まれる不純物の不要吸収や残留吸収、またはレーザー光の2光子吸収等の影響によって、波長変換中に熱が発生する場合がある。また、波長変換光が吸収端近傍の場合には、透過率が小なるために光の一部が素子に吸収されて熱になる。波長変換素子の温度が上昇すると、結晶中の屈折率が低下して位相整合条件

が崩れて変換光の出力が低下することになる。そこで、安定した波長変換光を出力させるためには、素子の温度を一定に維持することが必要になる。

【0003】 通常、銅やアルミニウム等の熱伝導率が大なる金属で構成したホルダ中に波長変換素子を設置して、そのホルダをオープンまたは温度コントロールされた水等の冷却媒体で常温以上に保持している。このとき、ホルダの温度は常時モニタされ、温度が変化した場合にはオープンや冷却媒体の温度を制御して一定の温度に維持するよう制御されている。

【0004】 また、素子の温度変化に対する屈折率が大なる波長変換素子を使用する場合には、素子の温度変動を波長変換効率が低下しない許容温度範囲以内に厳密に制御する必要がある。この場合、波長変換素子はペルチエ素子等を用いて精度良く温度制御がなされる。素子の温度を更に安定化させるために、例えば、特開平5-41557号公報では、波長変換素子を穴の開いたペルチエ素子中に埋め込む方法が提案されている。

【0005】 また、波長変換光の効率を向上させるためには、結晶長を大とすることが考えられる。しかし、波長変換結晶が有する複屈折性のために生じるウォークオフ角の問題があり、素子長を大としてもある一定の長さ以上は有効に作用しない。そこで、当該ウォークオフ角を補償すべく、2個以上の素子を位相整合方位に対して180°回転させた方位に設置する技術が提案されており、例えば、特開昭50-150453号公報や米国特許第5,047,668号公報等に開示されている。

【0006】

【発明が解決しようとする課題】 近年微細加工や半導体製造プロセス等の分野では、より微細な加工が可能となり短波長の波長変換光が求められている。また、加工の生産性を向上させるためにも、短波長光源の高出力化が期待されている。

【0007】 しかしながら、短波長化は波長変換素子が有する屈折率の分散特性と吸収端の波長により制限される高調波が発生可能な波長範囲に限られてくる。吸収端近傍まで波長変換可能な材料があっても、吸収端付近では屈折率の分散が大きく、吸収や表面反射ロスのために透過率が低く、効率の良い波長変換を行うことができない。

【0008】 また、波長変換を行っても吸収のため温度上昇が大きく位相整合条件が崩れてしまい、電子雪崩現象による誘電破壊も生じ易い。そのため、吸収端付近の波長変換は実用化されていない。

【0009】 また、短波長の波長変換になる程、波長変換素子の持つ屈折率の温度、波長、位相整合角度に対する許容範囲が小さくなる傾向があるため、安定した波長変換が難しくなるという問題がある。また複屈折性のためのウォークオフ角が大きくなってしまいう波長変換素子もあり短波長の光程誘電破壊閾値も低くなるので、結晶

長を長くしたり素子中のエネルギー密度を大きくして波長変換効率を向上させることは難しい。ウォークオフ角を2個の素子を用いて補償する試みもなされているが、より簡便な方法で波長変換効率を向上させることが求められている。

【0010】更に、光の波長が紫外領域になると2光子のエネルギーが波長変換材料のバンドギャップを越えてしまうため2光子吸収により熱の発生効率が高くなる。熱が発生すると素子中の屈折率が変化して位相整合条件が崩れ変換光出力が低下してしまう。産業応用においては、より高出力な紫外光が求められているため、効率良く素子を温度制御することが必要である。

【0011】温度が発生する部分は光が透過している素子部分であるが、従来方法ではこの部分を素子の回りから温度を制御しても波長変換素子の熱伝導率が小さいために、十分に素子の内部まで制御することができないため、制御しやすい素子の開発が必要である。

【0012】更にはまた、特に非線形光学定数の大きなベータバリウムボレイト ($\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$:BBO) を用いて193nmの紫外光を発生させる場合、この波長はBBOの吸収端である189nmに近く、193nmでは透過率が25%程度となってしまう、熱の発生が大きくまた誘電破壊が生じ易いことである。193nmはエキシマレーザのAr-Fが発振する光であり、この光は次世代の半導体メモリの生産に応用が期待されている。

【0013】しかしエキシマレーザは電気-光の効率が低くまた危険なガスを用いるため安全対策が必要であり、ランニングコストが高い。また装置の大きさが大きく、設置場所に面積を取られる。一方、もし193nmを、BBOを用いた全固体レーザで置換えられれば、ランニングコスト、装置コストの低減だけでなく、スペースや光の安定性等の問題も解決できる。

【0014】本発明の目的は短波長で高出力な紫外域の波長変換光を得るため、変換効率が大きく、温度制御されやすい波長変換方法及び波長変換素子を提供し、変換光出力の信頼性を向上させることにより紫外レーザ装置の産業応用を促進することである。

【0015】

【課題を解決するための手段】本発明によれば、波長変換材料の吸収端の波長から長波長側に100nm範囲の波長変換光を得るようにした波長変換方法であって、波長変換素子を0℃以下に冷却して波長変換をなすことを特徴とする波長変換方法が得られる。

【0016】また、本発明によれば、波長変換素子から出力されるレーザ光の進行方向を180°回転させて、前記波長変換素子へ再入力することを特徴とする波長変換方法が得られる。

【0017】更に本発明によれば、3つの角度が90°、45°、45°に夫々加工された三角柱プリズム素

子からなり、レーザ光をこの三角柱プリズム素子へ入射せしめ直交する2面に2回反射させることにより、入射レーザ光と波長変換された出力光との進行方向を互いに180°異なるようにしたことを特徴とする波長変換素子が得られる。

【0018】更にはまた、本発明によれば、入射レーザ光及び波長変換後の出力光の入出射面及び反射面の少なくとも一つの面に、当該面よりも大なる熱伝導率を有する材料を直接接合したことを特徴とする波長変換素子が得られる。

【0019】本発明の作用を述べる。波長変換素子の温度を冷却することにより吸収端が短波長側に伸びる材料があり、吸収端近傍の波長に対する透過率が向上する。透過率は冷却温度が低い程大きくなる。この特性を示す波長変換素子を使用して透過率が冷却により改善される領域の波長変換を行う場合、波長変換光が素子に吸収、反射されないため熱の発生も少なく、変換効率が良く安定した波長変換光を得ることができる。また吸収のため励起された電子の数が減り、電子雪崩による誘電破壊も生じにくくなる。

【0020】また、従来は2個以上の素子を用いているウォークオフ角の補償を入力したレーザ光を180°回転させることで1個の素子の内部で行うことが出来、レーザ光の波長変換効率を簡便に向上させることが可能となる。

【0021】また、波長変換素子が紫外光を吸収して加熱した場合、最も熱を持っている結晶中の光路を効率良く温度制御するために、レーザ光の入出力面に波長変換素子よりも熱伝導率の大きな材料を接合した波長変換素子を用い、この複合素子を温度制御することで発生した熱を直接入出力面から奪い、光路中の温度を一定に保ちやすくすることが出来る。

【0022】

【発明の実施の形態】次に、本発明の実施の形態について図面を参照して詳細に説明する。

【0023】図1は常温と0℃以下に冷却した波長変換素子の吸収スペクトルを示す図である。図1を参照すると、波長変換素子の持つ吸収端1から長波長側に100nm程度の範囲の波長は、屈折率が増大するために表面反射が大きく、また材料に光が吸収されてしまうため、透過率を測定すると曲線2の様に吸収端に近づくにつれて透過率が減少していく。

【0024】位相整合可能波長が吸収端の波長まで許容される波長変換素子を用いた場合、変換光3の透過率は4で示され、変換光のエネルギーの一部は材料に吸収されてしまい熱の発生や誘電破壊を生じさせる。しかし波長変換素子の温度を摂氏0℃以下に冷却することにより、波長変換素子の吸収端を5に示した様に短波長側にシフトする材料では、冷却しない場合と比較して吸収スペクトルが曲線6の様に変化し、変換光の透過率が7で示す

10

20

30

40

50

様に向上するため吸収の影響が小さく、誘電破壊や熱の発生を抑制して安定した変換光出力を得ることが出来る。

【0025】波長変換素子がBBOの場合、素子を冷却すると、図2の様に吸収端から長波長側に10nm程度の範囲の透過率が変化し、吸収端は常温8の状態では189nmであるが、0℃のBBO9では188nm、-50℃のBBO10では187nm、-100℃のBBO11では185nm、-150℃のBBO12では183nmにシフトする。

【0026】BBOはこの図に示した波長範囲で光混合による高調波発生が可能であり、この範囲の高調波を得る場合、素子を冷却することで変換光の吸収が減少し安定した信頼性のある紫外波長変換光を得ることが可能である。

【0027】図3は本発明の基本的な実施の形態を示す図である。レーザ光に対して高調波が得られる位相整合方位に加工された波長変換素子13に、光軸14を含む面を上部になる様に設置してレーザ光15を入射する。素子中の第1波長変換部16で一部が波長変換された後、素子から出力されたレーザ光及び波長変換光17はプリズム18に入射される。

【0028】第1反射面19及び第2反射面20で180°方向を転換した光は再度波長変換素子13に入射され、第2波長変換部21で入射レーザ光は波長変換され、波長変換光22が出力される。第1と第2の波長変換部分は光の進行方向に対して光軸が180°回転していることになり、ウォークオフ角を補償することが可能となる。また、1個の素子で素子長を2倍に取ることが出来るため変換効率を向上させることが出来る。

【0029】図4は本発明の他の実施の形態を示す図であり、図3と同等部分は同一符号にて示している。この波長変換素子23は図4に示す様に角度が90°、45°、45°のプリズム状に加工されており、入射面24から垂直に入射されたレーザ光15に対して位相整合角が取れる方位で光軸14は入射面と垂直の方位になる様に加工されている。入射されたレーザ光は第1波長変換部16で一部が波長変換され、第1反射面19で垂直に反射され、また、第2反射面20で垂直に反射された後、第2の波長変換部21で入射光は波長変換され、素子から波長変換光22が出力される。

【0030】第1と第2の波長変換部は共に位相整合方位であるが、光軸が180°回転しているためウォークオフ角を補償することが可能となり、また1個の素子で位相整合が取れる長さを2倍にすることが出来る素子であるため、波長変換効率が向上する。

【0031】図5は本発明の更に他の実施の形態を示す図である。両面研磨された波長変換素子13に波長変換素子よりも熱伝導率の良い材料25をレーザ光及び波長変換光17が入出力する面26に接合する。この複合素

子全体を銅やアルミ等で作製された金属ホルダー27に設置し、ホルダーは水や液体窒素等の媒体、オープンやペルチェ素子等で温度制御する。

【0032】素子の形態は矩形でも円形でも良いが、均一に冷却することを考えれば円筒型の方が望ましい。また、素子の大きさは出来るだけ必要最小限に加工した方が温度制御されやすい。従来方法では冷却が難しかった波長変換素子中のレーザ光及び波長変換光の光路17に生じた熱を波長変換素子の熱伝導28だけで冷却されていたが、波長変換素子から接合した熱伝導率の良い材料への熱伝導29が大きくなるため素子の温度を制御しやすくなる。すなわち、この複合素子を用いることで素子中の温度を均一に保つことが出来、安定した波長変換光を出力出来る。

【0033】図6は光学材料の熱伝導率と吸収端波長との関係を示す図であり、図5の接合のために用いる材料に熱伝導率が大きく、また吸収端が短波長に伸びている図6に示したダイヤモンド、サファイヤ、水晶、ガーネットを用いる。

【0034】図7は本発明の別の実施の形態を示す図である。図7の様に、図4で示したプリズム型波長変換素子23に熱伝導の大きな材料25を接合することで、光路中で発生した熱が接合面30を通して効率良く除去することが出来る波長変換素子となる。

【0035】図8は本発明の更に別の実施の形態を示す図である。図8の様に、ディスク状にした波長変換素子31の間に、素子よりも熱伝導率が大きくレーザ光及び波長変換に対して透明な材料25を接合して使用し、この複合素子全体を温度コントロールすることにより、素子長が長い場合では冷却できなかった結晶の中心部分を各々の短い素子長中で効率良く冷却することが出来る。この複合素子は高出力の紫外光を出力する波長変換の場合に非常に有効となる。

【0036】図8で示した素子では、波長変換光がウォークオフ角の影響により、素子数を多くしてもレーザ光と波長変換光の相互作用長を長く取ることが出来ない。しかし、図9の様に、波長変換素子の各々を結晶軸が180°反転する様な配置で設置することで、ウォークオフ角を補償して効率良く波長変換を行うことが出来、またディスク状の素子の枚数を増やして変換効率の向上が可能となる。

【0037】波長変換素子31と冷却のための材料25との接合に関し、図10の様に、まず接合面30をRIM5A程度に研磨する。次に光学材料を端から徐々に近づけていき(33)、完全に密着させる(34)。このとき密着が十分でない場合は素子を真空容器35に入れて容器を真空ポンプ36で引き、界面に残っている空気を除去する。こうすることで界面はファンデルワールス力で結合(オプティカルコンタクト)することが出来る。

【0038】

【実施例】次に実施例を用いて本発明を更に詳細に説明する。この実施例では波長変換素子としてベータバリウムボレイト (BBO) を用いたが、これに限定されるものではない。

【0039】 (実施例1) BBOを用いてAr-Fエキシマレーザを発振する波長と同じ193 nmを発生させるためには、193 nmにおける透過率を向上させる必要がある。そこで、まずBBO素子の低温における193 nmの透過特性を調べた。基本波にTi:サファイヤの発振する772 nmの第4高調波である193 nmを発生させるための位相整合方位 $\theta = 70.9^\circ$ にBBOをカットし、入射面 6×6 mmで長さが5 mmの素子を用意した。

【0040】この素子を低温吸収スペクトル測定用の真空チャンパー内の銅製のホルダー中に保持し、液体窒素で -195°C まで冷却していき、193 nmの透過率の変化を調べた。BBOの193 nmの屈折率は、屈折率分散の次の式、

$$n_o^2 = 2.7359 + 0.01878 / (\lambda^2 - 0.01822) - 0.01345\lambda^2$$

$$n_e^2 = 2.3753 + 0.01224 / (\lambda^2 - 0.01667) - 0.01516\lambda^2$$

より n_o で1.929329、 n_e で1.723228である。

【0041】 $\theta = 70.9^\circ$ での異常光の反射率 $R (= (1-n)^2 / (1+n)^2)$ は10%、両面透過させた場合は約20%となる。図11の様に -195°C まで冷やすことにより透過率は80%となり、表面反射のロス差し引くと殆ど結晶中に吸収されないことが分かった。

【0042】次に、実際に193 nmを出力させるために、772 nmを発振するパルスTi:サファイヤレーザ37の基本波を用いた。出力は平均で1 Wである。図12の様に、まず $\theta = 36.5^\circ$ でカットしたType IのLBO38で第2高調波 (SHG光) である386 nmを発生し、次に $\theta = 46.4^\circ$ にカットしたType IのBBO39で第3高調波 (THG光) である257.3 nmに変換し、最後に $\theta = 70.9^\circ$ にカットしたType IのBBO40で基本波の772 nmとTHG光である257.3 nmを光混合して第4高調波 (FHG光) である193 nmに変換する構成とした。

【0043】まず、SHG結晶であるLBO38は $4 \times 4 \times 10$ mmに加工し、素子には図13の様にサファイヤ39を両面からオプティカルコンタクトで貼付け、銅製のホルダー40でマウントした後、ホルダー全体をベルチェ素子41で 30°C に保持した。サファイヤは一軸性結晶であるが、BBO中を透過するレーザ光及び波長変換光に影響がない様に光軸方向に垂直加工してあるc板を用いた。

【0044】次に、THG結晶のBBO42は厚さ2 mmで ϕ が4 mmの素子を2個用意し、図14の様に3枚のc板サファイヤ39で挟み、夫々の素子はウォークオフ角を補償する方位になる様に設置してオプティカルコンタクトさせ、全体は円筒型の穴の開いたベルチェ素子41に保持して約 30°C に保持した。

【0045】FHG結晶は、図15の様に、厚さ5 mmで ϕ 6 mmの結晶43を銅製のコールドフィンガー44に保持し、サファイヤの窓45がついている真空デュワー46中に保持して液体窒素47で約 195°C まで冷却した。この素子構成で193 nmの発振実験を行ったところ、図16の性能48の様に、約100 mWの193 nm光が安定して50時間出力されることが分かった。

【0046】 (比較例1) 193 nmの発生を実施例1と同じ構成で行い、3個の波長変換素子のうち1個だけの条件を変化させた場合の193 nm出力の安全性を比較した。まずSHG素子にサファイヤ基板を接合せずに行ってみたところ、図16の特性49の様に、サファイヤとSHG素子との界面反射ロスがなくなった分だけ初期の出力は向上したが、レーザ光の光路中に温度勾配が生じて徐々に出力が低下していった。

【0047】次に、THG素子を8 mmの長さの素子1個を用い、サファイヤの基板を接合せずに193 nm発生を行ったところ、図16の特性50の様にウォークオフの補償を行っていない分だけ初期出力が30%程度低下し、またその後出力も素子中に温度勾配が生じて位相整合条件が崩れ、徐々に出力が低下していった。次に、213 nmを得るためのFHG素子を液体窒素で冷やさずに常温で行ったところ、213 nmの出力は、図16の特性51の様に20%以下となり、また出力は急激に低下した。素子を観測したところ、193 nmの吸収のために誘電破壊が生じていることが分かった。

【0048】 (実施例2) BBOを用い、Nd:YALレーザの発振する1064 nm光の第4高調波 (FHG) が得られる方位は $\theta = 47.6^\circ$ である。この方位になる様に、図17で示した3 mmの素子長で入射面積が 5×10 mmの素子52を加工し、入射面積が 6×6 mmの石英ガラスで出来たプリズム53を2個設置した。この素子にNd:YAGレーザの第2高調波であるビーム径1 mmの5 Wの532 nm光を入射したところ、第1から第3の波長変換部 (16, 21, 54) で波長変換され、またウォークオフ角も補償されるため変換効率が向上し、1.5 WのFHG光を得ることが出来た。

【0049】 (比較例2) 実施例2と同じ素子を用い、ワンパスで波長変換を行ったところ、出力は500 mWしか得られず、図17の場合と比較して約1/3の出力しか得られなかった。

【0050】 (実施例3) BBOを用い、Nd:YAGレーザの発振する得られる1064 nmの第3高調波 (THG) が得られる方位はType Iで $\theta = 31^\circ$ で

ある。この方位が入射方位となる様に、18の様なプリズムに加工したBBO素子55を2個用意した。このプリズムに1064nm1Wと532nm500mWを入射したところ、第1～第4の波長変換部(16, 21, 54, 56)で波長変換され、またウォークオフ角も補償することが出来たため変換効率が向上し、500mWの355nm出力が得られた。

【0051】(比較例3) BBOの結晶長が8nmTHG素子を用い、実施例3と同じレーザ光を入射したところ、355nm出力は350mWであり、実施例3の70%の出力しか得られなかった。

【0052】(実施例4) BBO単結晶をNd:YAGレーザの発振する第4高調波が得られる方位である $\theta = 47.6^\circ$ に加工した。素子の大きさは入出力面を6×6mm、厚さを2mmとし、この素子57を4枚用意した。この素子と同じ大きさの冷却材料として用いるサファイヤ基板39を5枚用意した。これ等の素子の入出力を平面度RIM5A以下、平行度は5秒以下に加工研磨した。BBOは互いの素子の光軸が180°回転させてウォークオフ角を補償する方位に調整し、この間にサファイヤ基板を挿入してこれ等の素子をオプティカルコンタクトした後、図19の様に穴の開いたペルチェ素子41にマウントし25℃に保持した。

【0053】この素子にNd:YAGの発振する100Wの1064nmからBBOを用いて得られた第2高調波(波長532nm)の50Wの光を入射したところ、15Wの266nm光が得られた。連続的な波長変換の安定性を調べたところ、図20の特性58の様に100時間に渡り±1%以内であり、非常に安定した紫外出力が長時間安定して得られることが分かった。これは波長変換素子で発生した第4高調波の光路の温度が常にサファイヤにより吸収されて25℃に保持されており、位相整合条件が一定しているためである。

【0054】(比較例4) 実施例2と同じBBO素子を用い、サファイヤ基板を用いずにBBO素子だけを用いて図21の様に素子を一体化させ、同じペルチェ素子で25℃に保持した。波長532nmの50Wの光を入射したところ、始めは実施例4と比較して界面表面反射ロスが少ないため17Wの266nmが得られたが、数分後には図20の特性59の様に、12W程度まで低下した。低下しきったところで素子の角度を再度調整したところ出力は16Wまで回復したが(60)、また徐々に低下していき、100時間後に12W程度まで低下した(61)。

【0055】これはBBOの各々の素子中のレーザ光路中が十分に冷却されていないために時間と共に温度分布が生じ、屈折率が変化してしまうために出力が低下してしまう。また素子の角度を調整しても紫外出力が大きくなると熱発生も大きく、屈折率が変化して変換効率が下がり、また紫外出力が下がるという悪循環が生じて一定

した出力の光が得られない。

【0056】

【発明の効果】第1の効果は、波長変換素子を用いて素子の吸収端近傍の波長変換を行う場合、本発明によれば吸収端を短波長側にシフトさせることが可能となり、波長変換光の透過率が向上して出力の増大、安定性、信頼性の向上が達成されることである。

【0057】その理由は、素子の変換光に対する透過率が向上することで光が結晶に吸収反射されることがなくなり、エネルギーのロスが少なくなるからである。

【0058】第2の効果は、1個の波長変換素子で位相整合方位に2回以上のレーザ光を透過させることが出来、波長変換効率を増大させることが可能であることである。その理由は結晶長を2倍に稼ぐことが出来、またウォークオフ角を補償するからである。

【0059】第3の効果は、波長変換素子を効率良く冷却することで素子中に発生した熱による屈折率分布を抑制することが出来ることである。その理由は屈折率の分布は熱の分布と一致するため、熱勾配を抑制することにより位相整合条件が安定し、変換光出力も安定化させることが出来る。

【0060】これ等の波長変換方法及び波長変換素子を搭載した紫外発生レーザ装置は出力が安定し、信頼性が向上するため微細加工、半導体プロセス、医療等に応用される。また、特に193nm発生装置は次世代メモリのプロセスに用いるAr-Fエキシマレーザの代替として用いることが可能であるため、半導体産業に与える効果は大きい。

【図面の簡単な説明】

【図1】常温と0℃以下に冷却した波長変換素子の吸収スペクトルを示す図である。

【図2】BBOの冷却による吸収スペクトルの変化を示す図である。

【図3】プリズムを用いたウォークオフ角補償方法の説明図である。

【図4】プリズム型波長変換素子を示す図である。

【図5】熱伝導率の大きな材料を入出力面に接合した波長変換素子を示す図である。

【図6】光学材料と熱伝導率と吸収端波長を示す図である。

【図7】プリズム型波長変換素子に熱伝導率の大きな材料を接合した波長変換素子を示す図である。

【図8】2個以上の波長変換素子を熱伝導率の大きな材料で挟んで接合した波長変換素子を示す図である。

【図9】2個以上の波長変換素子をウォークオフ角が補償する様に配置し、その間に熱伝導率の大きな材料を接合した波長変換素子を示す図である。

【図10】波長変換素子と熱伝導率の大きな材料とのオプティカルコンタクトを示す図である。

【図11】BBOの冷却曲線と193nmの透過率を示

す図である。

【図12】193nm光の発生方法を示す図である。

【図13】サファイヤ基板を接合したLBO、SHG素子を示す図である。

【図14】ウォークオフ角を補償したTHG素子にサファイヤ基板を接合したBBOの、THG素子を示す図である。

【図15】-195℃に冷却したBBO、FHG素子を示す図である。

【図16】193nm出力の時間変化を示す図である。

【図17】プリズム2個を用いて1個の波長変換素子にレーザ光を3回透過させた波長変換方法を示す図である。

【図18】プリズム型波長変換素子2個を用いた波長変換方法を示す図である。

【図19】4個のBBO、FHG素子波長変換素子をウォークオフ角が補償する様に配置し、その間にサファイヤ基板を接合した波長変換素子を示す図である。

【図20】266nm出力の時間変化を示す図である。

【図21】4個のBBO、FHG波長変換素子をウォークオフ角が補償する様に配置した波長変換素子を示す図である。

【符号の説明】

- 1 常温時の吸収端
- 2 常温時の吸収スペクトル
- 3 波長変換光の波長
- 4 常温時の透過率
- 5 低温時の吸収端
- 6 低温時の吸収スペクトル
- 7 低温時の透過率
- 8 常温時のBBOの吸収スペクトル
- 9 0℃でのBBOの吸収スペクトル
- 10 -50℃でのBBOの吸収スペクトル
- 11 -100℃でのBBOの吸収スペクトル
- 12 -150℃でのBBOの吸収スペクトル
- 13 波長変換素子
- 14 光軸

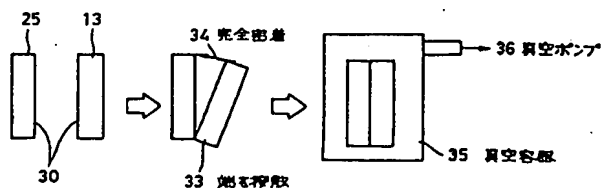
- 15 レーザ光
- 16 第1波長変換部
- 17 レーザ光と波長変換光
- 18 プリズム
- 19 第1反射面
- 20 第2反射面
- 21 第2波長変換部
- 22 波長変換光
- 23 プリズム型波長変換素子
- 24 入射面
- 25 熱伝導の大きな接合材料
- 26 入出力面
- 27 金属ホルダー
- 28 波長変換素子の熱伝導による熱流
- 29 接合材料の熱伝導による熱流
- 30 接合面
- 31 ディスク状波長変換素子
- 32 銅製ホルダー
- 35 真空容器
- 36 真空ポンプ
- 37 Ti:サファイヤレーザ
- 38 LBO、SHG素子
- 39、42 BBO、THG素子
- 40、43、52 BBO、FHG素子
- 41 ペルチェ素子
- 44 銅製コールドフィンガー
- 45 サファイヤの窓
- 46 真空デュワー
- 47 液体窒素
- 48 実施例1による出力結果
- 53 石英プリズム
- 54 第3の波長変換部
- 55 プリズム型BBO、THG素子
- 56 第4波長変換部
- 57 BBO、FHG波長変換素子
- 58 実施例4によるFHG出力
- 59 比較例4の初期FHG出力
- 61 角度調整後のFHG出力

【図6】

接合のための光学材料	熱伝導率 (W/mK)	吸収率 (nm)
ダイヤモンド	30	220
アルミナ	21	160
水晶	9	180
ガーネット	12	300

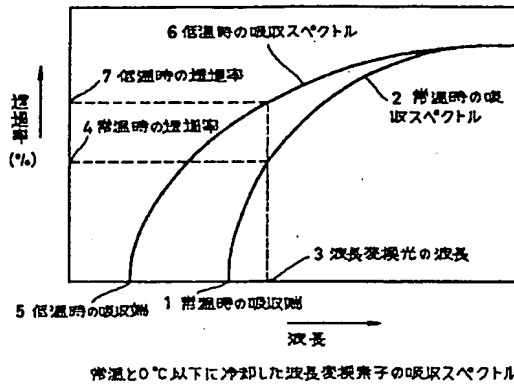
光学材料の熱伝導率と吸収率の表

【図10】

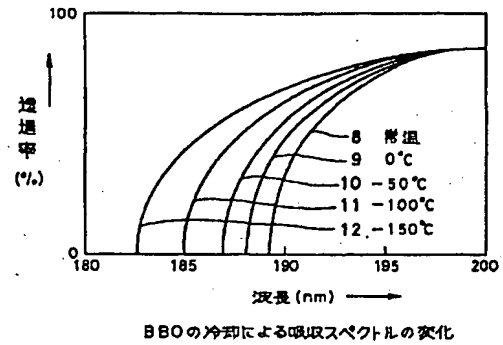


波長変換素子と熱伝導の大きな材料とのオプティカルコンタクト

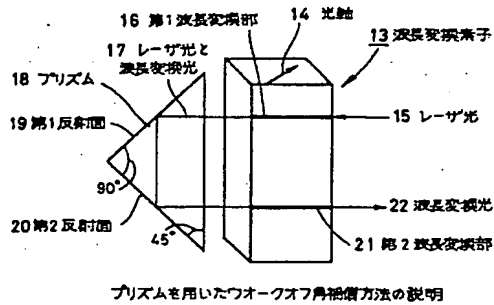
【図1】



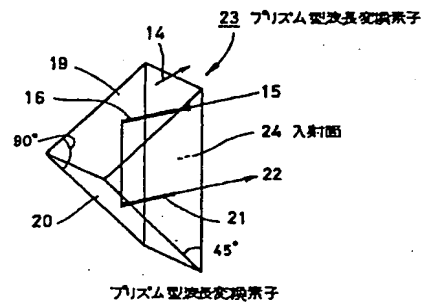
【図2】



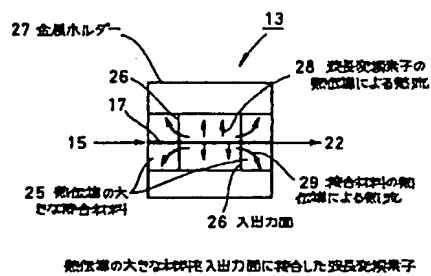
【図3】



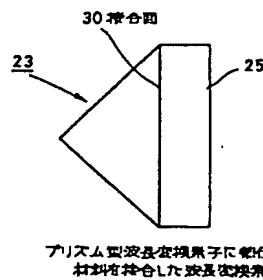
【図4】



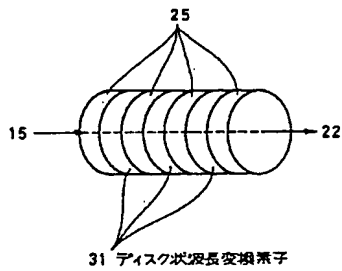
【図5】



【図7】

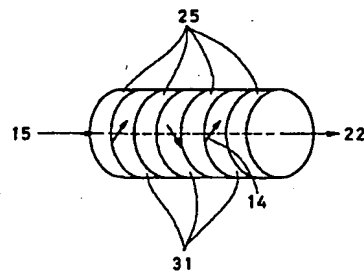


【図8】



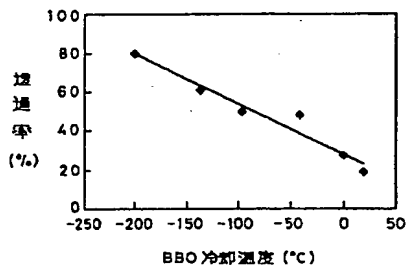
2個以上の波長変換素子を配伝導の大きな材料ではさんで持合した波長変換素子

【図9】



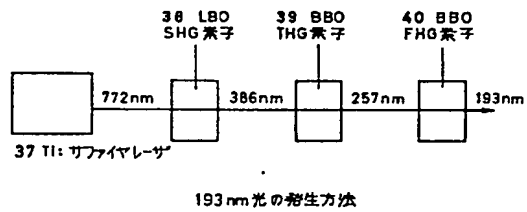
2個以上の波長変換素子をウオークオフ角が補償するように配置し、その間に配伝導の大きな材料を持合した波長変換素子

【図11】

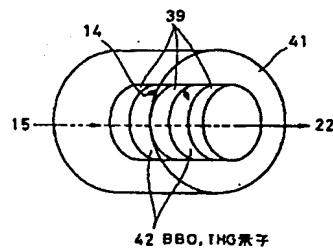


BBOの冷却温度と193nmの変換率

【図12】

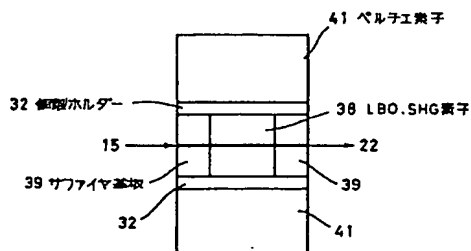


【図14】



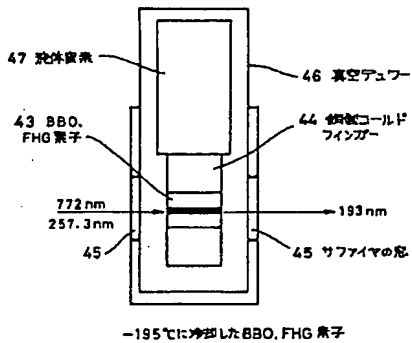
ウオークオフを補償したTHG素子にサファイヤ基板も持合したBBO, THG素子

【図13】

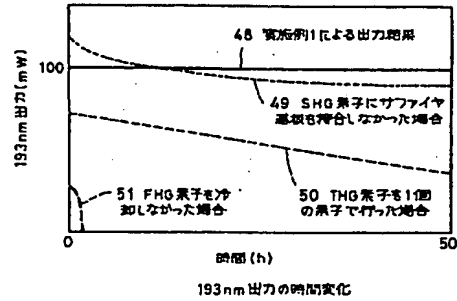


サファイヤ基板も持合したLBO, SHG素子

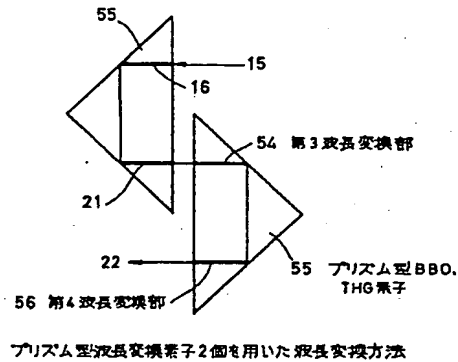
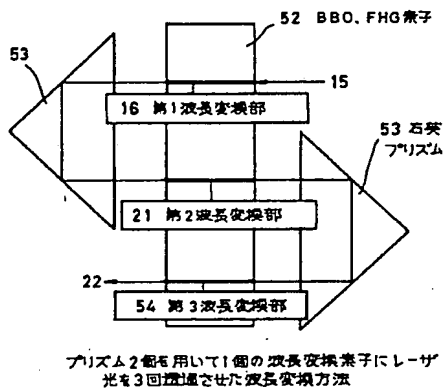
【図15】



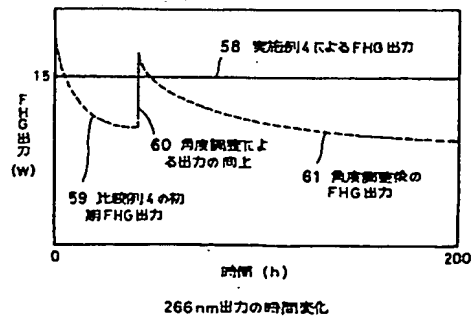
【図16】



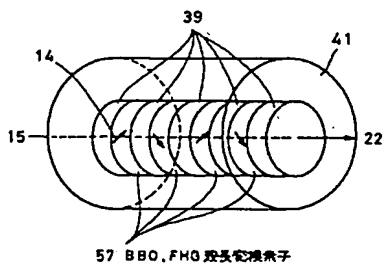
【図18】



【図20】

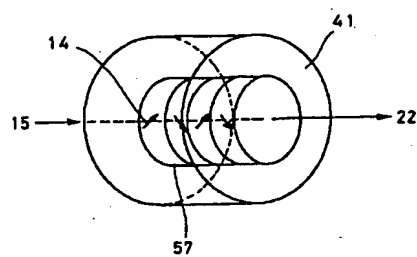


【図19】



4個のBBO/FHG波長変換素子もフックオフ角が揃うように配置し、その間にサファイア基板も挿入した波長変換素子

【図21】



4個のBBO、FHG波長変換素子をウォークオフ角が補償するように配置した波長変換素子